

9^{èmes} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

10 - 11 - 12 MARS 2003

POITIERS - FUTUROSCOPE

ABSORBEURS POREUX MULTI-PLAQUES DE FAIBLE ENCOMBREMENT ET TIRANT D'EAU. OPTIMISATION ET EXPERIENCES.

POROUS WAVE ABSORBER. OPTIMIZATION AND EXPERIMENTS.

O. KIMMOUN

Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Marseille, 13451 Marseille cedex 20

Résumé

Afin, d'absorber les ondes transverses dans le bassin de génie océanique de l'IFREMER Brest, on se propose d'équiper celui-ci d'absorbeurs latéraux, constitués d'une série de plaques poreuses verticales enfoncées d'un certain tirant d'eau. Dans le but d'optimiser ce système, on minimise la moyenne des coefficients de réflexion sur un intervalle période-cambrure choisi, grâce à l'utilisation d'un code potentiel. Le seul paramètre fixé dans cette étude est l'encombrement de l'ensemble qui doit être faible. Une campagne expérimentale a été menée pour valider les calculs précédents. Une technique vidéo de suivi de surface nous a permis de mieux comparer les résultats théoriques et expérimentaux.

Summary

In the way to absorb transverse waves in a wave basin, we propose to install lateral wave absorber made of a series of vertical porous plates submerged at a given draft. To optimize this system, we minimize the mean reflection coefficient over a period-steepness range using a potential model. The width of the system is given and had to be small. Experiments are conducted in order to validate the previous calculation. Finally a video technique is used to better understand the difference between numerical and experimental results.

1 Introduction

Dans un bassin de houle, où la largeur est importante vis-à-vis de la longueur, peuvent apparaître soit de manière naturelle, soit liées à la présence d'une structure, des ondes dans la direction transverse à la houle. Etant donné que les murs latéraux réfléchissent entièrement cette onde transverse, celle-ci peut mettre un temps infini à s'amortir. Pour parer ce phénomène, divers absorbeurs latéraux ont été installés dans les bassins avec plus ou moins de succès. La difficulté dans la conception de tels systèmes est qu'ils ne doivent pas interférer avec la houle incidente et absorber le plus rapidement possible l'onde transverse. Dans cet ordre d'idée, pour équiper le bassin de génie océanique de l'IFREMER Brest, on se propose d'étudier un système constitué d'un ensemble de plaques poreuses verticales enfoncé d'un certain tirant d'eau. Une des difficultés dans le choix de tels absorbeurs provient de la multiplicité des paramètres à prendre en compte : le nombre de plaques poreuses, la porosité de chaque plaque, le tirant d'eau de l'ensemble, la période et l'amplitude de la houle à absorber, le seul paramètre fixé pour notre étude étant l'encombrement. L'idée de cette étude est de déterminer la répartition optimale des porosités conduisant à un minimum du coefficient de réflexion moyen de la houle. Cette optimisation est répétée pour différents tirants d'eau et nombre de plaques. Il a été trouvé pour ce type d'encombrement une répartition originale de porosité et une bonne efficacité pour l'absorption. De plus il s'avère qu'il existe un tirant d'eau optimal correspondant à un enfoncement faible du système. Une série d'expériences a été réalisée dans le canal à houle de l'ESIM. Celles-ci ont montré que dans l'ensemble il y avait une bonne adéquation entre théorie et expérience, mais que pour les grandes périodes, la théorie surestime le coefficient de réflexion. Dans le but d'expliquer cette différence nous avons effectué des prises de vue vidéo afin de détecter l'élévation de surface libre dans chaque compartiment de l'absorbeur et nous avons comparé les valeurs extrêmes entre théorie et expérience.

2 Modèle

2.1 Présentation

Le modèle utilisé ici est celui développé par Molin et Fourest (1992). L'idée principale de ce modèle réside dans l'utilisation d'une loi de perte de charge à travers la plaque comme étant une fonction quadratique de la vitesse horizontale de l'écoulement. C'est à dire que le différentiel de pression à travers la plaque est de la forme :

$$\Delta p = \frac{1 - \tau}{2 \mu \tau^2} \rho u |u| \quad (1)$$

où μ est un coefficient de perte de charge dépendant de la géométrie des perforations, du taux de vide et du nombre de Reynolds, pris égal à 0.5 dans notre cas. τ est le coefficient de porosité, défini comme le rapport de la surface des trous à la surface totale. La géométrie du problème est décrite sur la figure (1).

Dans chaque sous-domaine (D_p) on suppose qu'une théorie linéaire potentielle est applicable. On cherche donc à déterminer les coefficients complexes du potentiel complexe Φ_p correspondant au domaine compris entre les plaques p et $p + 1$. Ce potentiel s'écrit sous la forme :

$$\Phi_p(x, y, t) = \mathcal{R} \left[\phi_p(x, y) e^{-i\omega t} \right]$$

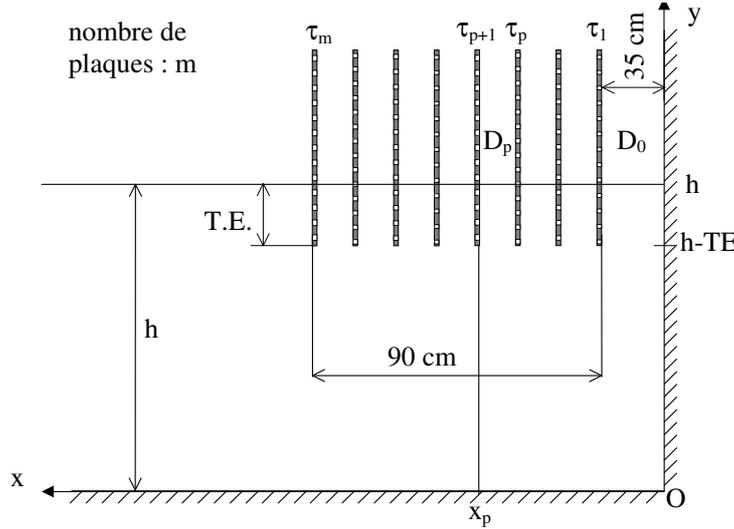


Figure 1: *Géométrie du problème*

$$\text{avec } \phi_p(x, y) = \frac{ag}{\omega} \frac{\cosh(k_0 y)}{\cosh(k_0 h)} \left(a_p e^{ik_0 x} + b_p e^{-ik_0 x} \right) + \sum_{n=1}^N \left(c_{p,n} e^{k_n(x - x_{p+1})} + d_{p,n} e^{-k_n(x - x_p)} \right) \cos(k_n y)$$

$$\text{et } p \in [1, m] \quad x \in [x_p, x_{p+1}] \quad \text{et } y \in [0, h]$$

Où h est la profondeur, et les k_0, k_n les nombres d'onde donnés par

$$\omega^2 = gk_0 \tanh(k_0 h) = -gk_n \tan(k_n h)$$

a, b_p correspond à l'amplitude incidente dans le domaine D_p compris entre la plaque p et $p + 1$, a, a_p correspond à l'onde réfléchie, et les $c_{n,p}$ et $d_{n,p}$ correspondent aux modes évanescents, avec N le nombre de modes évanescents considérés. Donc pour le domaine semi-infini D_m on a :

$$b_m = 1 \quad \text{et} \quad c_{m,n} = 0 \quad \text{avec} \quad n \in [0, N]$$

et dans le domaine contre le mur D_0 où la réflexion est totale :

$$a_0 = b_0 \quad \text{et} \quad c_{0,n} e^{-k_n x_1} = d_{0,n} \quad \text{avec} \quad n \in [0, N]$$

Les conditions qui doivent être vérifiées sont :

- Egalité des vitesses horizontales au droit de la plaque :

$$\frac{\partial \phi_{p-1}(x_p, y)}{\partial x} = \frac{\partial \phi_p(x_p, y)}{\partial x} \quad (2)$$

- L'équation de perte de charge à la plaque, exprimée en terme de potentiel par l'utilisation de l'équation de Bernoulli en négligeant le terme $(\nabla \phi)^2$:

$$\Delta p = \rho \left(\frac{\partial \Phi_{p-1}}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_p}{\partial t} \right) = \rho \frac{1 - \tau_p}{\mu \tau_p^2} \frac{\partial \Phi_p}{\partial x} \bigg|_{\frac{\partial \Phi_p}{\partial x}} \quad \text{en } x = x_p$$

qui peut être simplifiée en utilisant la linéarisation de Lorentz :

$$\mathcal{R} \left(a e^{-i\omega t} \right) \left| \mathcal{R} \left(a e^{-i\omega t} \right) \right| \simeq \frac{8}{3\pi} |a| \mathcal{R} \left(a e^{-i\omega t} \right)$$

pour obtenir

$$\phi_{p-1} - \phi_p = f_p(y) \quad \text{avec} \quad f_p(y) = -\frac{4i}{3\pi\omega} \frac{1 - \tau_p}{\mu\tau_p^2} \frac{\partial\phi_p}{\partial x} \left| \frac{\partial\phi_p}{\partial x} \right| \quad \text{en} \quad x = x_p \quad (3)$$

avec $f_p(y)$ une fonction supposée connue. Le problème obtenu étant non linéaire, il est résolu de manière itérative. C'est à dire qu'à l'itération j , on calcul $f_p(y)$ en utilisant la valeur de ϕ_p calculée à l'itération $j - 1$.

Pour tenir compte d'un tirant d'eau variable la porosité τ_p sera une fonction de y . De ce fait une porosité égale à un, correspondra à une absence de plaque.

$$\tau_p = 1 \quad \text{pour} \quad y \in [0, h - TE]$$

En reportant la forme du potentiel dans l'équation (2), on obtient $N + 1$ relations :

$$\begin{cases} a_{p-1}e^{ik_0x_p} - b_{p-1}e^{-ik_0x_p} & = a_p e^{ik_0x_p} - b_p e^{-ik_0x_p} \\ c_{p-1,n} - d_{p-1,n}e^{-ik_n(x_p-x_{p-1})} & = c_{p,n}e^{ik_n(x_p-x_{p+1})} - d_{p,n} \quad \text{avec} \quad n \in [1, N] \end{cases} \quad (4)$$

En utilisant l'orthogonalité des fonctions $\cosh(k_0y)$ et $\cos(k_ny)$, l'équation (3) permet d'obtenir de même $N + 1$ relations :

$$\begin{cases} (a_{p-1} - a_p)e^{ik_0x_p} + (b_{p-1} - b_p)e^{-ik_0x_p} & = I_{p,0} \\ c_{p-1,n} + d_{p-1,n}e^{-ik_n(x_p-x_{p-1})} - c_{p,n}e^{ik_n(x_p-x_{p+1})} + d_{p,n} & = I_{p,n} \quad \text{avec} \quad n \in [1, N] \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{avec} \quad I_{p,0} = \frac{\omega}{ag} \cosh(k_0h) \frac{\int_0^h f_p(y) \cosh(k_0y) dy}{\int_0^h \cosh^2(k_0y) dy} \quad \text{et} \quad I_{p,n} = \frac{\int_0^h f_p(y) \cos(k_ny) dy}{\int_0^h \cos^2(k_ny) dy}$$

En combinant les systèmes d'équations (4) et (5) on obtient :

$$\begin{cases} a_p & = a_{p-1} - \frac{1}{2}e^{-ik_0x_p} I_{p,0} \\ b_{p-1} & = b_p + \frac{1}{2}e^{ik_0x_p} I_{p,0} \\ c_{p-1,n} & = c_{p,n}e^{-ik_n(x_{p+1}-x_p)} + \frac{1}{2}I_{p,n} \\ d_{p,n} & = d_{p-1,n}e^{-ik_n(x_p-x_{p-1})} - \frac{1}{2}I_{p,n} \end{cases}$$

Afin de contrôler la convergence du schéma itératif, une méthode de relaxation est utilisée.

2.2 Calculs

La méthodologie pour optimiser ce système est la suivante :

- On considère un système à 10, 7, 5 ou 3 plaques poreuses avec un tirant d'eau de un mètre. On fixe initialement la porosité de toutes les plaques à 58%¹. On tire aléatoirement un numéro de plaque et on ajuste la porosité pour obtenir un minimum de la

¹la porosité des plaques, liée à son mode de fabrication, est comprise entre 8 et 58%

moyenne du coefficient de réflexion. On réitère cette opération jusqu'à convergence vers un minimum local. Ce calcul est répété une fois pour vérifier si l'on obtient le même minimum. Pour des raisons de rapidité de calcul on ne prend pas en compte, dans cette première itération, les modes évanescents. La moyenne du coefficient de réflexion correspond à la moyenne sur une grille de 12 périodes par 12 cambrures réparties sur les intervalles suivants :

$$T \text{ de } 1 \text{ à } 2 \text{ secondes} \quad \text{et} \quad \frac{H}{\lambda} \text{ de } 0.005 \text{ à } 0.025$$

le coefficient de réflexion moyen étant donné par :

$$\bar{R} = \frac{1}{12^2} \sum_T \sum_{H/\lambda} R(T, H/\lambda)$$

La répartition des porosités pour ce premier calcul est présentée sur la figure (2). Pour les systèmes de plaques poreuses de grand encombrement, le résultat classique de la répartition des porosités est une répartition décroissante du large vers le mur. Dans notre cas on remarque que la plaque poreuse vers le large est de faible porosité, ensuite la porosité décroît de la deuxième plaque à la dernière (excepté pour le cas 3 plaques). Pour chaque résultat d'optimisation, les calculs de coefficient de réflexion ont été réitérés avec 20 modes évanescents. Dans le tableau ci-dessous on donne le coefficient de réflexion moyen en fonction du nombre de plaques :

Nombre de plaques	10	7	5	3
\bar{R} (%)	12.74	12.61	12.61	13.03

Il apparaît que ce système est plus sensible à l'encombrement qu'au nombre de plaques.

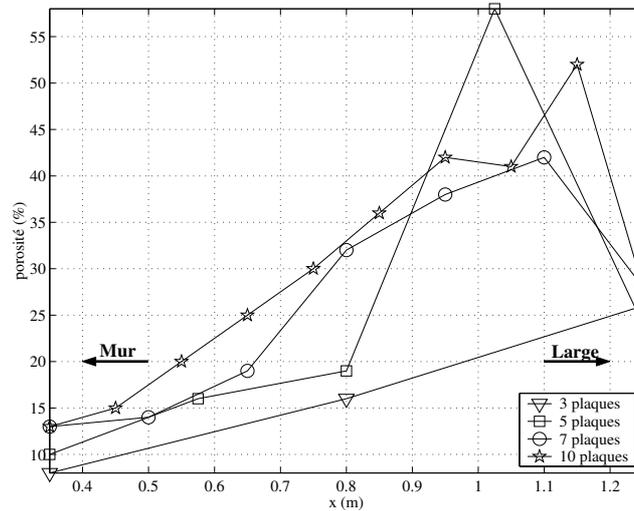


Figure 2: répartition des porosités pour les cas 3, 5, 7 et 10 plaques

Deux exemples de calcul de réflexion sont donnés sur les figures (3) gauche et droite pour respectivement 7 et 5 plaques. On remarque d'ailleurs qu'il y a peu de différence entre les différents cas de plaques. De manière générale on remarque que ce système est efficace pour les périodes et cambrures que l'on veut absorber, excepté pour les périodes les plus grandes d'amplitude faible.

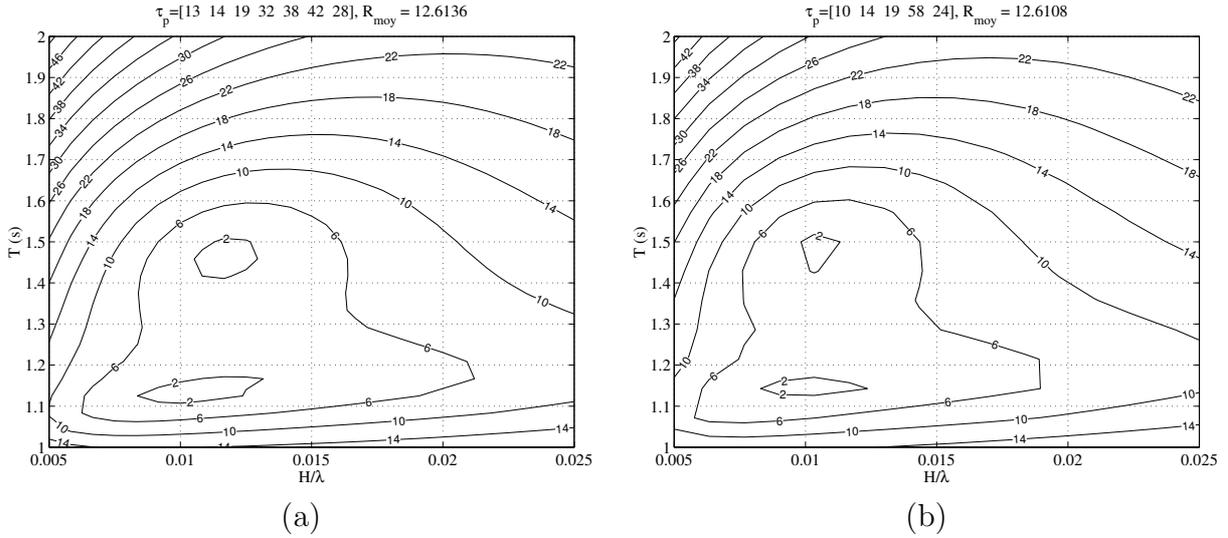


Figure 3: Evolution du coefficient de réflexion en fonction de la période et de la cambrure pour un tirant d'eau de 1 mètre, sur une grille 25×25 avec 20 modes évanescents : (a) pour un système à 7 plaques, (b) pour un système à 5 plaques.

- A partir de la répartition trouvée précédemment, on fait varier le tirant d'eau de 1,30 mètres à 30 centimètres en prenant en compte 20 modes évanescents. Il est important de prendre en compte les modes évanescents car si on les néglige, le tirant d'eau optimal est égal à la profondeur. Sur la figure (4) nous avons tracé l'évolution du coefficient de réflexion moyen en fonction du tirant d'eau du système de plaques pour les cas 7, 5 et 3 plaques. On peut remarquer qu'il existe un minimum commun aux 3 cas pour un tirant d'eau proche de 45 centimètres.

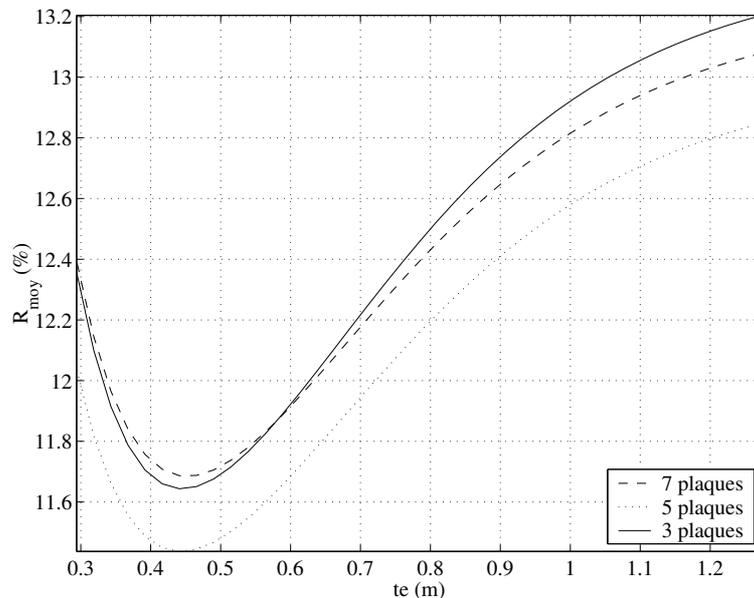


Figure 4: Evolution du coefficient de réflexion moyen en fonction du tirant d'eau pour les cas 3, 5 et 7 plaques

- Pour ce tirant d'eau, on relance une optimisation, toujours avec 20 modes évanescents. La nouvelle répartition de porosité est présentée sur la figure (5). On peut remar-

quer que l'on retrouve une faible porosité coté large, mais dans ce cas le nombre de plaque de porosité grande est plus importante avec la présence d'un deuxième maximum près du mur pour les cas 10, 7 et 5 plaques. Finalement on se retrouve avec un système alterné peu poreux, très poreux, peu poreux, poreux, peu poreux.

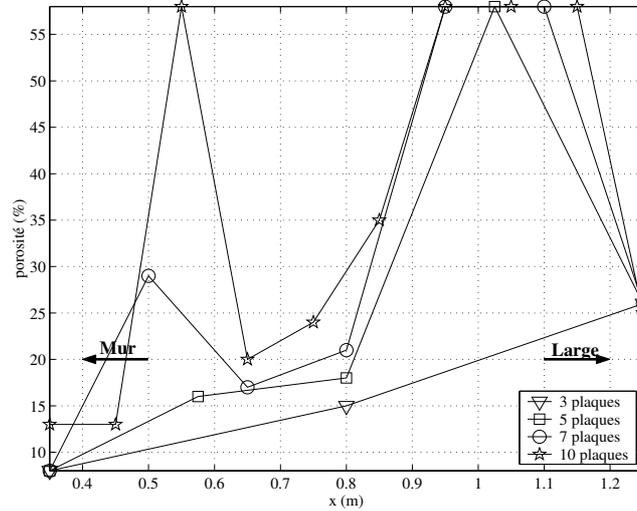


Figure 5: Deuxième itération : répartition des porosités pour les cas 3, 5, 7 et 10 plaques

On peut voir à travers l'évolution du coefficient de réflexion sur l'intervalle cambrure-période présenté sur les figures (6) et (7) que cette nouvelle optimisation améliore nettement l'efficacité du système pour les grandes périodes et les grandes cambrures. Par contre, il s'avère que le cas grandes périodes, petites cambrures est toujours critique pour ce genre d'absorbeur. Dans le tableau ci-dessous, nous donnons la valeur du coefficient de réflexion moyen en fonction du nombre de plaques :

Nombre de plaques	10	7	5	3
\bar{R} (%)	10.01	9.86	9.78	11.41

Il s'avère que le système optimal correspondrait au cas 5 plaques avec un tirant d'eau de 45 centimètres.

3 Expériences

3.1 Présentation

Afin de valider le modèle numérique et la méthode d'optimisation, nous avons effectué une campagne de mesures dans le canal à houle de l'ESIM long de 18 mètres et large de 65 centimètres. La profondeur d'eau pour les expériences a été fixée à 77.7 centimètres. Les calculs de l'évolution du coefficient de réflexion ont été réitérés avec cette profondeur et avec les valeurs des porosités trouvées précédemment. Les essais ont été effectués sur deux configurations de 5 et 7 plaques. Pour chacune de ces configurations nous avons fait varier le tirant d'eau, du système posé sur le fond, au système surélevé de 40 centimètres et effectué 15 essais pour parcourir l'intervalle période-cambrure étudié précédemment.

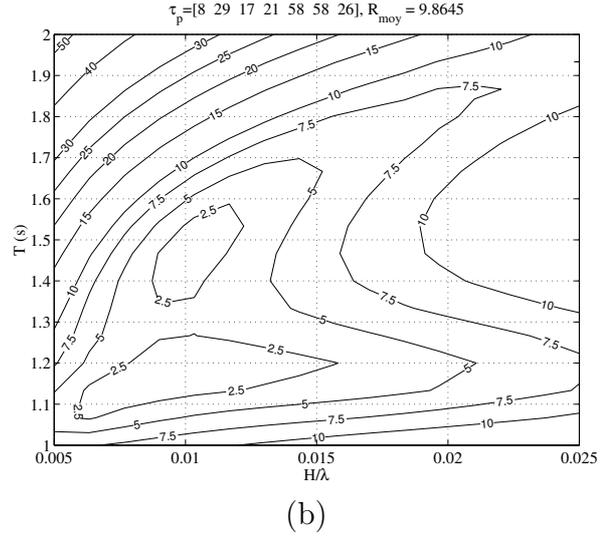
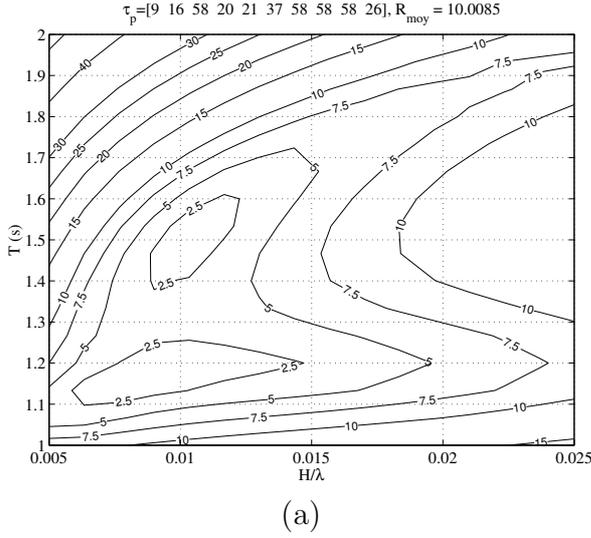


Figure 6: Evolution du coefficient de réflexion en fonction de la période et de la cambrure pour un tirant d'eau de 0.45 mètre, sur une grille 25×25 avec 20 modes évanescents pour (a) un système de 10 plaques, (b) un système de 7 plaques.

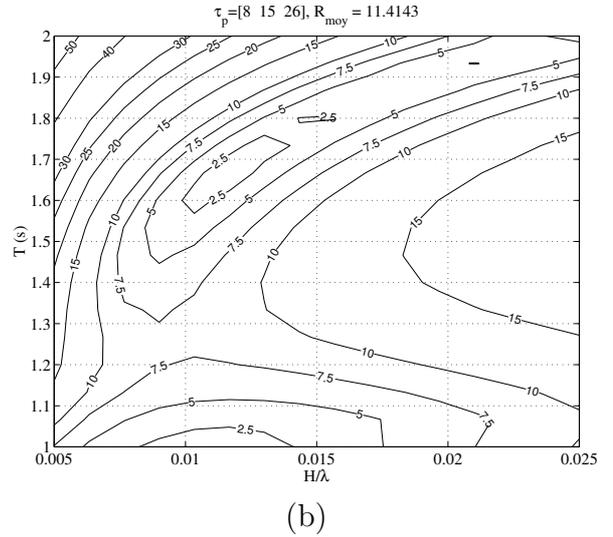
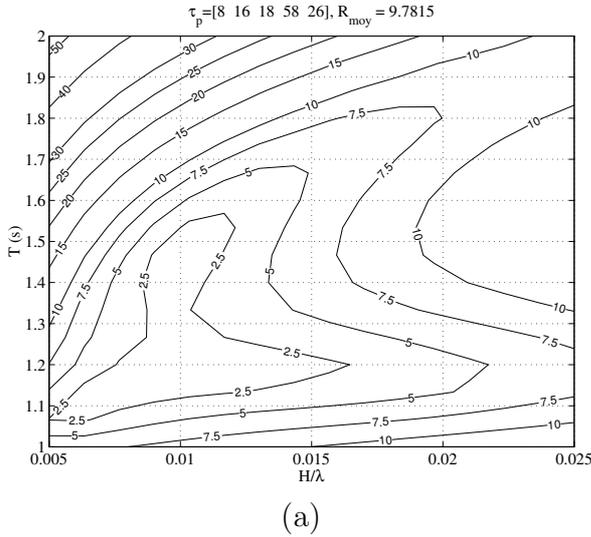


Figure 7: Evolution du coefficient de réflexion en fonction de la période et de la cambrure pour un tirant d'eau de 0.45 mètre, sur une grille 25×25 avec 20 modes évanescents pour (a) un système de 5 plaques, (b) un système de 3 plaques.

Etant donné que le but principal était d'amortir le quatrième mode propre transversal du bassin de l'IFREMER-Brest large de 12 mètres, nous avons raccourci artificiellement le canal en rajoutant une plaque verticale à 9.60 mètres du batteur, correspondant au quatrième mode pour la profondeur de notre expérience. Une série de photographies présentée sur les figures (8) à (10) donne un aperçu du montage expérimental.

3.2 Coefficient de réflexion

Pour les mesures nous avons utilisé 7 sondes à vagues disposées le long du canal. A partir de ces données, nous avons calculé par une méthode des moindres carrés le coefficient

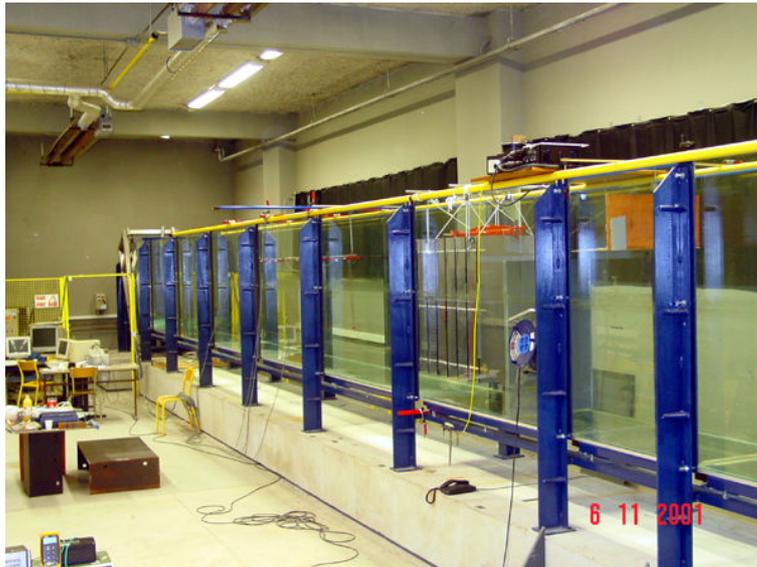


Figure 8: *Vue d'ensemble du canal avec le système d'absorbeur poreux*



Figure 9: *Vue de côté du montage avec le système à 7 plaques*

de réflexion (Mansard & Funke 1980). Etant donné que les résultats sont très similaires entre les essais 5 plaques et 7 plaques, seuls les essais 5 plaques sont présentés. Sur les figures (11) à (14), nous avons reporté les valeurs expérimentales (cercle) superposées aux données numériques pour les 4 tirants d'eau testés. De plus, nous avons reporté, sur le tableau ci-dessous, la moyenne des coefficients expérimentaux et théoriques :

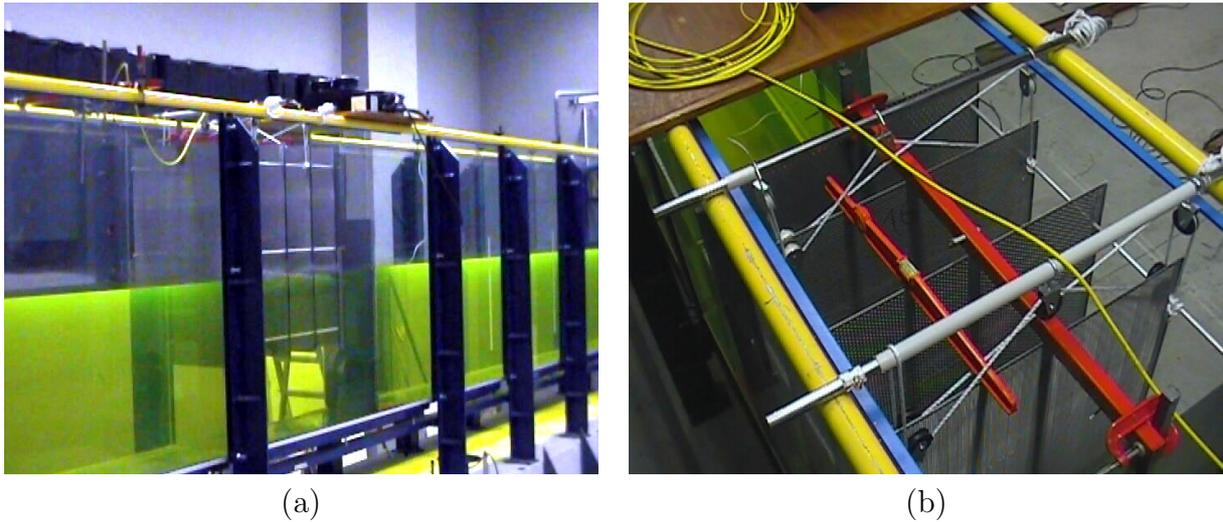


Figure 10: (a) Vue avant du canal avec le système à 5 plaques. (b) Vue du dessus du montage avec le système à 5 plaques.

tirant d'eau (m)	h	h-0.20	h-0.30	h-0.40
\bar{R} (expérimental en %)	10.42	9.03	9.10	12.03
\bar{R} (théorique en %)	11.29	10.74	10.41	10.04

Les remarques qui peuvent être dégagées de ces résultats sont les suivantes :

- Dans l'ensemble il y a une bonne adéquation entre théorie et expérience excepté pour les grandes périodes où la théorie surestime l'expérience. Cette observation est valable quel que soit le tirant d'eau.
- Le tirant d'eau optimal pour notre expérience est aux alentours de $h - 0.20$, alors que théoriquement ce minimum est de l'ordre de $h - 40$. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'on utilise une théorie de Stokes en eau peu profonde, ce qui correspond à une limite de notre code.

3.3 Essai d'extinction

Un essai d'extinction a été effectué avec le canal sans système d'absorption et avec le système à 5 plaques. Le but était de mesurer le temps nécessaire pour obtenir une amplitude résiduelle de $1/50$ l'amplitude initiale, pour le quatrième mode propre, de période 2 secondes.

Sur la figure (15) nous avons tracé l'évolution temporelle de la surface libre, à gauche avec le système d'absorption et à droite sans. Le temps d'amortissement avec les plaques est de 1 minute 29 secondes, alors qu'il est de 16 minutes et 16 secondes sans. Cet exemple montre l'efficacité de ce système d'absorption.

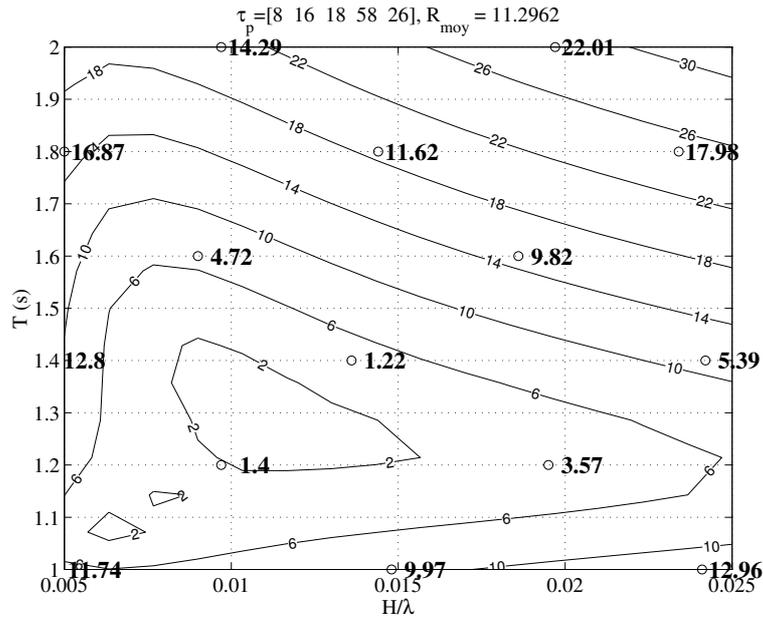


Figure 11: Evolution du coefficient de réflexion - tracé en contour pour les données théoriques et cercles pour les données expérimentales. Cas à 5 plaques, tirant d'eau égal à la profondeur.

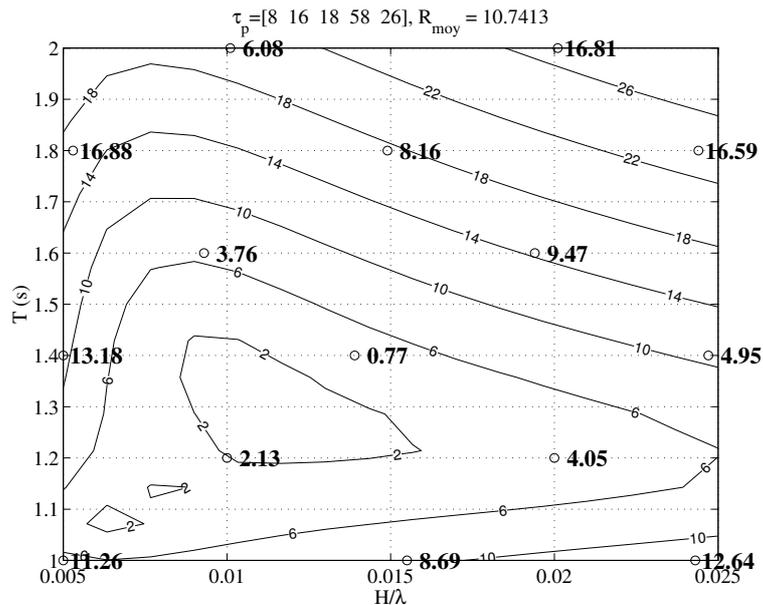


Figure 12: Cas à 5 plaques, tirant d'eau égal à la profondeur moins 20 cm.

3.4 Visualisations

Conjointement aux mesures effectuées avec les sondes à vagues, nous avons réalisé des prises de vues vidéo permettant la capture de l'élévation de la surface libre dans chaque compartiment. Un exemple d'image est présenté sur la figure (16-a) pour le système à 7 plaques. Sur la figure (16-b) nous avons superposé l'élévation théorique et l'élévation expérimentale de chaque compartiment de l'absorbeur pour un essai de période 1 seconde et de cambrure de 0.025 à deux temps séparés de $T/2$. Cette comparaison est représentative de la différence que l'on peut obtenir entre les essais et la théorie. Pour essayer de quantifier cette différence nous avons reporté sur le tableau suivant l'erreur

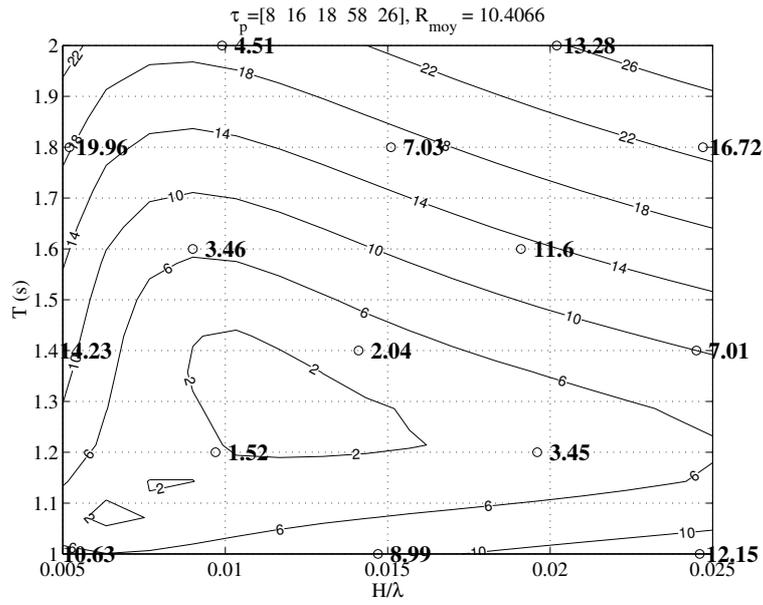


Figure 13: Cas à 5 plaques, tirant d'eau égal à la profondeur moins 30 cm.

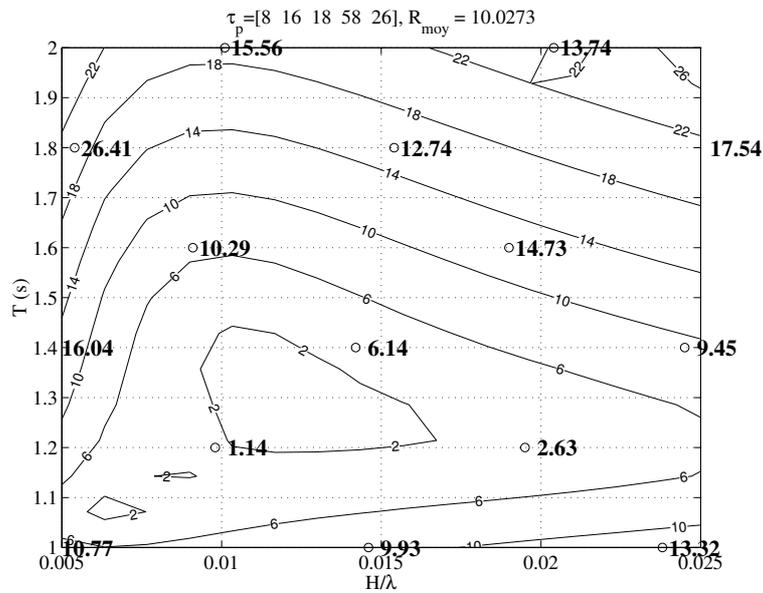


Figure 14: Cas à 5 plaques, tirant d'eau égal à la profondeur moins 40 cm.

relative en (%) entre l'amplitude crête à creux théorique et expérimentale dans chaque compartiment et pour chaque essai considéré :

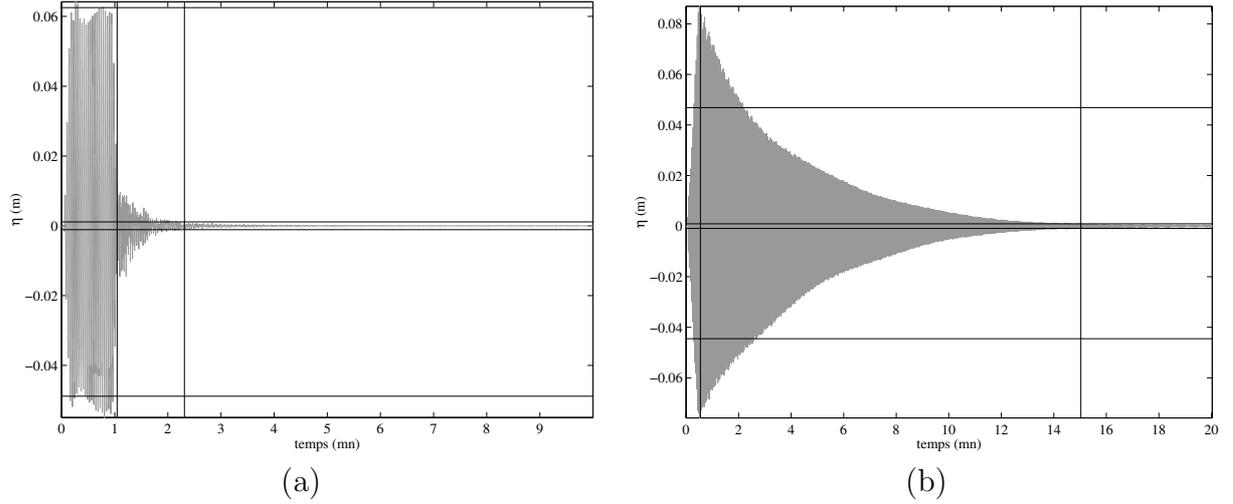


Figure 15: (a) Evolution temporelle de la surface libre pour le quatrième mode propre en présence des plaques poreuses. Les traits horizontaux extérieurs correspondent à l'amplitude de l'onde incidente avant réflexion. Les traits intérieurs correspondent au cinquantième de l'amplitude initiale. Le premier trait vertical correspond à la fin de la génération batteur. Le deuxième correspond au temps où l'amplitude atteint le cinquantième. (b) Evolution temporelle de la surface libre pour le quatrième mode propre sans les plaques poreuses

n°	T (s)	H/λ	R_{exp} (%)	R_{th} (%)	compartiment n°						
					1	2	3	4	5	6	7
1	1.0	0.025	15.75	13.05	1.10	3.25	0.30	0.30	0.80	5.00	12.15
2	1.2	0.020	5.00	3.90	3.55	5.20	0.30	5.40	2.00	7.55	5.65
3	1.4	0.025	4.75	6.85	1.30	2.70	3.55	4.20	6.15	8.05	8.80
4	1.6	0.020	15.55	15.85	0.55	10.40	0.10	0.60	1.95	5.35	10.90
5	1.8	0.025	9.90	15.15	2.25	8.50	3.90	1.15	3.55	3.20	7.60
6	2.0	0.020	20.45	22.45	2.60	11.76	6.60	3.90	2.90	2.15	5.00
porosité de la plaque avant (%)					26	58	58	21	17	29	8

Tableau 1 : Erreur relative en % entre les amplitudes crêtes à creux théoriques et expérimentaux dans chaque compartiment numéroté 1 à 7 de l'absorbeur.

A travers ce tableau, on peut voir qu'il n'y pas de différence notable entre les essais, alors que l'on aurait pu s'attendre à trouver des écarts plus forts pour l'essai n° 5. En règle générale, l'écart le plus grand se trouve dans le deuxième et le dernier compartiments pour des porosités de plaque très différentes de respectivement 58 et 8%. Mais il apparaît que cette analyse sur la surface libre ne nous permet pas de conclure quant aux différences entre théorie et expériences. C'est donc plutôt vers une mesure du champ de vitesses qu'il faudrait se tourner avec une technique type P.I.V.² qui nous permettrait d'avoir des informations du pied de la plaque à la surface libre.

4 Conclusion

A partir d'un calcul d'optimisation, nous avons pu déterminer un absorbeur latéral peu encombrant ayant des performances suffisantes pour l'application en bassin. L'expérience

²Particle Image Velocymetry

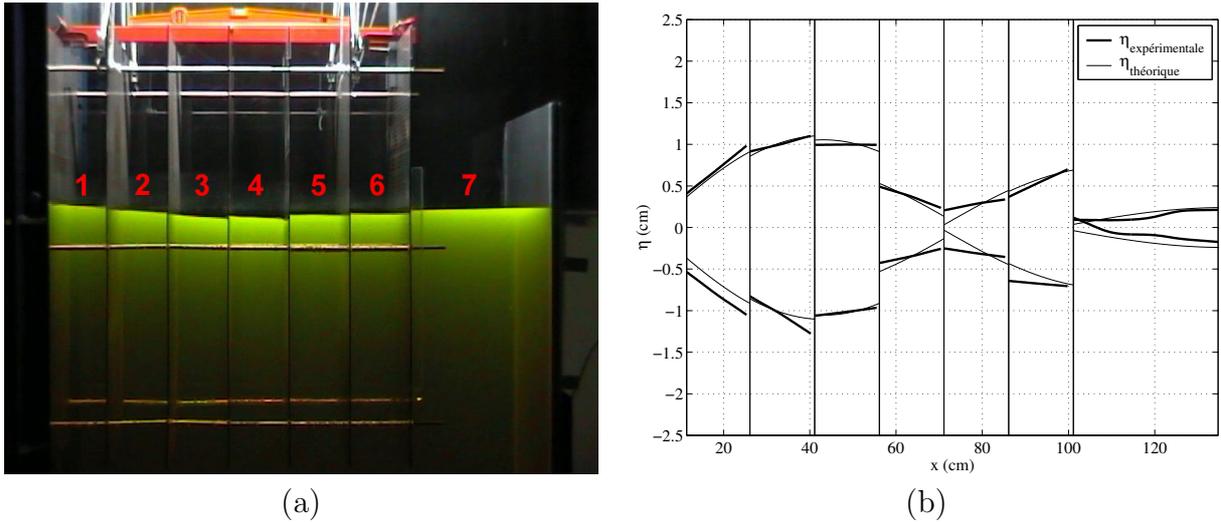


Figure 16: (a) Image extraite de la séquence vidéo de l'essai n° 1 : $T = 1$ s, $H/\lambda = 0.025$. (b) Comparaison entre élévation théorique et expérimentale dans chaque compartiment pour 2 temps différents.

nous a permis de valider nos calculs. Cependant pour les résultats expérimentaux, les coefficients de réflexion sont inférieurs aux données théoriques avec parfois des écarts importants. L'analyse des données de surface libre ne nous a pas permis de comprendre cette différence. Il s'avère donc que c'est au sein de l'écoulement que l'on puisse trouver l'explication et peut être plus particulièrement à la base des plaques poreuses où l'amortissement par la génération de vortex peut être non négligeable. De plus de part les dimensions verticales du canal, le rapport de la profondeur sur la longueur d'onde est faible pour les grandes périodes et la résolution de ce problème en utilisant les équations de Boussinesq peut s'avérer intéressante.

Références

E.P.D. MANSARD & E.R. FUNKE 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least square method, *Proc. 17th Coastal Eng. Conf.*, Sydney, Australie.
 B. MOLIN & J.M. FOUREST 1992. Numerical modelling of progressive wave absorber, Actes, *7th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies.*, Val de Reuil.

Remerciements

Ce travail a été effectué en collaboration avec Marc Le Boulluec et financé partiellement par l'IFREMER dans le cadre d'un contrat d'études en partenariat avec l'ESIM